

太阳爆发:源动力之谜*

苏 杨^{1,†} 甘为群^{2,††}

(1 格拉茨大学 奥地利 格拉茨 8010)

(2 中国科学院紫金山天文台 中国科学院暗物质与空间天文重点实验室 南京 210008)

2013-12-20收到

† email: yang.su@uni-graz.at

†† email: wqgan@pmo.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20140101

Solar eruptive events: mystery of the engine

SU Yang^{1,†} GAN Wei-Qun^{2,††}

(1 University of Graz, Graz 8010, Austria)

(2 Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

摘 要 看似宁静的太阳上存在着诸多活动现象, 其中的爆发活动, 包括耀斑(solar flares)和日冕物质抛射(CMEs), 是太阳系内最剧烈的能量释放, 也是造成空间环境和空间天气变化的最主要因素。磁场重联一直被认为是其背后的驱动力, 然而确凿的证据一直没有找到。现在, 新一代观测卫星太阳动力学天文台(SDO)终于记录到了完整可信的日冕重联过程。文章中我们简要回顾太阳爆发的研究历史, 介绍最新的研究成果, 并讨论将来的研究重点。

关键词 太阳活动, 日冕, 太阳耀斑, 日冕物质抛射, 磁场重联, 太阳UV辐射, 太阳X射线, 太阳 γ 射线辐射

Abstract Among solar activities, flares and coronal mass ejections (CMEs) are the most powerful energy release in solar system and the main factors in the changes of space weather. Magnetic field reconnection has been believed to be the driver of these solar eruptive events. However, the solid evidence of the whole process are still missing. Now, the Solar Dynamics Observatory (SDO) finally captured complete evidence of magnetic reconnection in the corona. In this article, we briefly review the history of studies on solar eruptive events, present the latest results, and discuss on the main research subjects in future.

Keywords solar activity, solar corona, solar flares, coronal mass ejections (CMEs), magnetic field reconnection, solar UV radiation, solar X-rays, solar gamma rays

1 不安静的太阳

作为当前唯一一个人类可以详细研究的恒星, 太阳不仅是人类的一个天然实验室, 也是一个了解其他恒星和宇宙成分的窗口。在我们的眼睛里, 太阳似乎永远只是个发亮的圆盘, 除了偶

尔能看到上面的麻点——太阳黑子之外, 再无其他变化。然而在望远镜内, 那里却是另一番景象: 这里的磁化等离子体无时无刻不在运动变化, 它们或喷出, 或落下, 或震荡, 或旋转, 形成黑子、暗条、针状体、磁龙卷、冕洞、冕雨、冕环等各种结构。其尺度大都远远超过地球的大小。

耀斑(solar flare)和日冕物质抛射(coronal mass ejection, CME), 是这些活动中最剧烈的现象。尽管它们可独立发生, 但越来越多的研究表

*国家重点基础研究发展计划(批准号: 2011CB811402)、国家自然科学基金(批准号: 11233008)资助项目, 欧洲HESPE项目(批准号: 263086)

明,两者往往是同一爆发事件的两个方面^[1-3],其所具有的能量也是相近的^[4],因此常被统一称为“太阳爆发性事件(solar eruptive events)”。传统意义上的耀斑即是指太阳各层大气内被加热而增亮的部分(图1),CME则是被加速抛离太阳的部分(图2)。耀斑的特征是,从射电到X射线甚至 γ 射线的几乎全波段上的辐射全面增强。耀斑发生区的等离子体可被快速加热至几千万度,而电子和质子通常被加速到几百keV到几十MeV,甚至更高能量。CME可将上百亿吨的等离子体磁云以每秒几百至上千公里的速度抛向行星际空间,成为影响行星磁层和空间天气状况的最主要因素。

耀斑最早是1859年在可见光波段于一个大黑子群附近观测到的^[5],被称为白光耀斑。但日面本身的白光辐射很强,只在少数耀斑时才能看到。系统性的观测和研究开始于1930年。最常用的地面观测手段是利用H-alpha等谱线¹⁾和射电辐射等。而紫外线、X射线等由于受到地球大气的吸收而无法在地面接收。20世纪70年代以后,基于卫星的空间观测快速发展,目前已成为提供太阳观测资料的主力军^[6]。耀斑的定义标准是,引起太阳1—8 Å(1.6—12.4 keV)软X射线流量增强的事件。根据GOES卫星(the Geostationary Operational Environmental Satellite)所记录的峰值流量的不同可划分为A, B, C, M和X几个级别,其强度以十倍递增²⁾。X级耀斑在几十分钟内释放出的总能量可达 10^{25} J,超过上亿颗千万级核弹的总和,而且可引发日震^[7](Sunquake,见图3)。

同很多其他太阳活动现象一样,太阳爆发多产生于黑子或黑子群周围的太阳活动区^[6]内,其发生频率和黑子密切相关。黑子是太阳上的强磁场区,其温度比周围要低,因而相对较暗。它周围的活动区就像漂浮在等离子体海洋里的磁岛,一生经历浮现、发展和消失等过程。其他地方虽然也有结构运动和变化,但因相对平静被称为宁

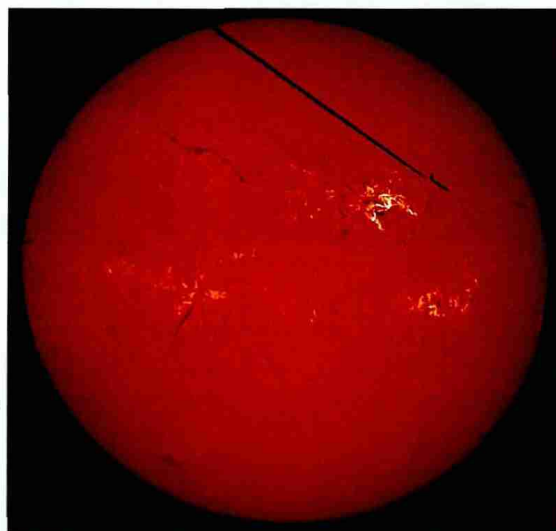


图1 一架飞机掠过H-alpha望远镜中的太阳表面。飞机左侧的亮带是一个活动区内被耀斑所加热的表层大气。图中狭长的暗带是暗条,而活动区内黑色的斑状结构是黑子。该图由奥地利格拉茨大学Kanzelhöhe天文台提供

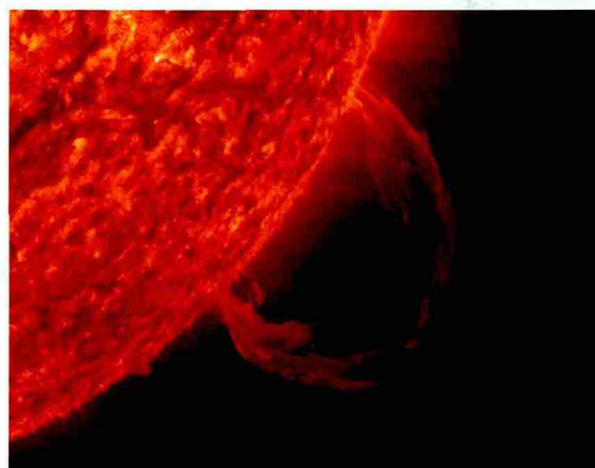


图2 2013年5月NASA太阳动力学天文台(SDO)观测到的一个太阳爆发事件中被抛出的等离子体磁绳(flux rope)

静区。世界公认的最早对太阳黑子的记载出自公元前28年中国的《汉书·五行志》。由于黑子的出现具有11年的周期性,太阳活动区和活动现象也呈同周期变化(图4)。即在太阳活动峰年时,会有更多黑子出现,也就会有更多的爆发现象。从

1) H-alpha谱线是氢原子巴尔末线系中的第一条谱线,波长6563 Å,是电子由第二激发态向第一激发态跃迁时产生的。由于氢在太阳和宇宙里元素丰度最高,因此这条可见光谱线在天体观测中非常重要。

2) 有系统记录以来最大的太阳爆发产生于2003年11月4日的一个超级活动区,其强度超出了GOES的探测范围(俗称“爆表”),最终被评估为X28级以上,其释放的CME时速达到2300 km/s。而目前最大的恒星耀斑当属2005年探测到的事件^[8],其强度达到普通太阳耀斑的百万倍以上。

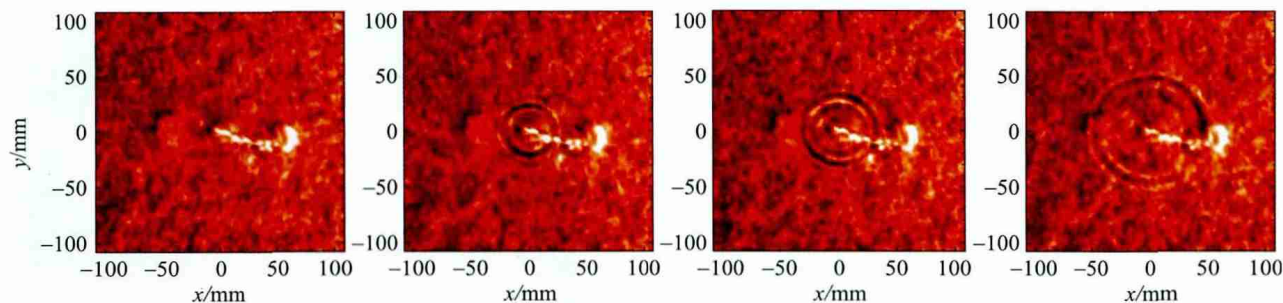


图3 1996年7月9日X2.6级耀斑引起的日震, 据称烈度相当于11.3级的地震, 由欧洲航天局(ESA)和美国国家航空航天局(NASA)联合研制的太阳和太阳风层探测器(Solar and Heliospheric Observatory, 缩写为SOHO) SOHO/MDI观测到。图中显示的是视线方向上(即垂直纸面)的速度场, 从中可以清楚的看到震波的传播。该结果取自 Kosovichev 和 Zharkova 在1998年 *Nature* 杂志上发表的文章^[7]

1755年算起的第一周开始, 我们现在(2013年前后)正在经历第24周的峰年。也正因为这个原因, 太阳爆发曾作为元凶之一被卷入了2012末日论。实际上, 我们当前所经历的阳光活动峰年是百年来最弱的一个。

太阳爆发活动确实可以影响人类生活, 但非末日论所宣称的。太阳爆发的产物中包括增强的辐射、高能粒子流、等离子体磁云等。其中各个频段上的太阳辐射确实可大幅增强, 包括极紫外、高能X射线和 γ 射线, 但由于辐射随距离的平方而减弱, 在地球处的辐射(日地距离为1天文单位, 约1.5亿千米)远不如在太阳表面的强度。加上地球大气层的保护, 目前认为这种辐射对地面人员和设备的影响并不明显。而高能粒子流和

等离子体磁云可影响地球附近的空间环境, 产生磁暴, 损害大型供电输电设备和卫星仪器, 干扰无线电通信和GPS系统。对极地飞行的乘客和太空中的宇航员亦存在潜在威胁。因此有人称, 太阳活动是现代人类社会的一种“富贵病”。随着我们的普通生活越来越依赖电能和各种电子仪器, 以及航天航空的发展, 空间天气研究开始受到各国重视。灾害性空间天气中最著名的一个事例是, 1989年3月9日的日冕物质抛射导致3月13日加拿大魁北克的电力网络大规模断电, 至少持续了9小时, 有600万人受到影响。此外, 有迹象表明, 太阳活动还可能影响天气和气候。不过, 好的一面是, 这些爆发的磁化等离子体和地球磁场相互作用也会造成梦幻绚丽的极光。

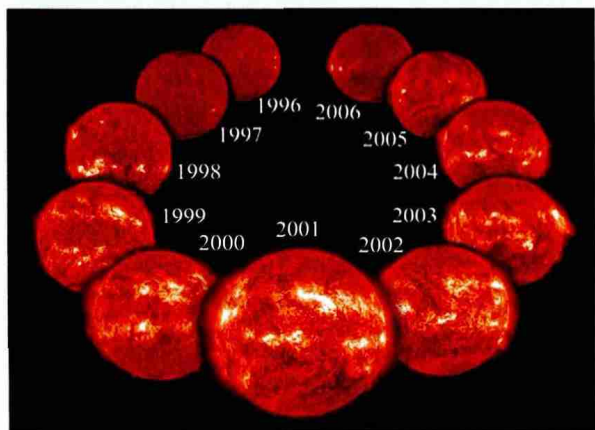


图4 这个图显示了太阳低层日冕在第23太阳周内由平静到“活跃”然后又恢复平静的变化。图片来自 NASA 网站(SOHO/EIT, ESA, NASA)

2 太阳爆发和磁重联

耀斑的理论研究随着观测同步发展。虽然出现过多种理论模型, 但大多无法解释观测^[6]。目前的各种耀斑模型虽基于不同的磁结构, 但核心都是一样的, 即磁场通过重联释放能量。20世纪40年代和50年代, 磁场重联理论模型³⁾被提出。

3) 许多文章这样描述磁重联: 磁力线在重联区断开, 然后重新连接形成新的磁力线。作者认为这种说法不准确。按当前的理论, 磁力线是不可能断开的。因为即使是瞬间断开, 也意味着磁单极子的存在。但是目前尚未有足够证据支持这一现象。实际上, 中心电流片区域是两侧相反磁场分量的过渡区, 磁力线在此是平滑地同另一侧的磁力线相连并流出的。这也是磁零点(magnetic null point)的存在对磁重联非常重要的一个原因。

磁场重联最早称为磁湮灭，后来经过发展，现在常提到的模型主要是 Sweet—Parker 慢磁重联和 Petschek 快速磁重联^[6, 9]。

在最简单的两维磁场重联图像里(图5)，相反方向的磁力线互相靠近，并在中间形成X型结构和电流片。在X型结构的中心区，磁场为零，两侧的磁力线在这里重新相连，然后在磁张力作用下如同拉满的弓弦快速由电流片的两端弹出重联区，形成重联出流。磁场重联及电流片中的耗散(欧姆加热)使磁压减小，两侧的磁力线进一步补充进来，推动重联持续进行。部分磁能在此过程中被转化为热能和粒子动能。

虽然这一理论的提出是为解释耀斑中快速释放的巨大能量，但最先是在实验室、聚变装置和行星际空间得到大量观测的证实^[11]。这里的等离子体属性，如磁场、密度、速度等，可通过探头或卫星直接测量得到。人们已经认识到，磁重联作为磁化等离子体中一个重要基本过程存在于宇宙各级等离子体系统中。半个多世纪以来，太阳物理学家也一直在努力寻找太阳爆发由磁重联驱动的证据。然而，这个过程并不顺利。

首先，目前还没有技术手段可以使探测器深入高温高辐射的太阳大气内直接探测等离子体，这是一个劣势，只能通过记录太阳在各个波段上的光辐射来推算等离子体的状态，这包括成像和谱线探测。对于大尺度的重联区来说，这一点相比行星际空间的探测是个优势，因为后者只能通过几个卫星探测点信息，而无法了解整个区域的总体结构。其次，太阳大气的温度分布很广，从几千度到耀斑中的千万度，其磁场结构非常复杂，且耀斑是动力学过程，对观测仪器的多温度探测能力^[4]以及时间和空间分辨率要求很高。而这些能力的提高又受限于工程技术能力的发展。

这里有必要介绍一下太阳大气的结构特点。由低到高，太阳表层大气由光球、色球和日冕组

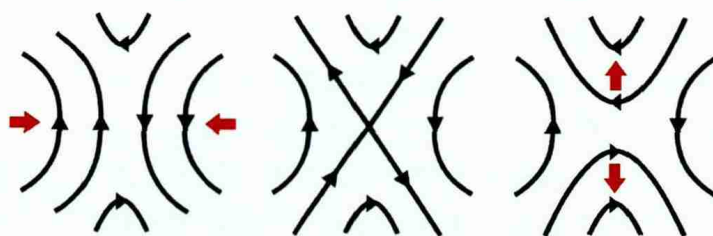


图5 磁场重联的示意图。相反走向的磁力线相互靠近，形成X型结构，重新连接后的磁场从另外两端像绷紧的皮筋一样弹出重联区。取自文献^[10]

成。其中光球就是我们平时看到的太阳表面，温度约6千度，厚度约500千米；色球厚度约2000多千米，这里的温度上升到几万度或更高，然后快速过渡到百万度的日冕^[12]。日冕加热问题，即太阳大气温度由表面向外不降反升，被科学(*Science*)杂志选为天体物理八大谜题之一^[13]。

日冕中的等离子体具有高温、低密度的特点。由于磁场的存在，等离子体一般情况下只能沿着磁场运动，从而形成各种日冕环^[12]，是活动区日冕的主要结构。这里的磁压一般大于气压，即磁场占主导地位。等离子体和磁场可以说是绑定的。因此，虽然磁力线是假想的，无法观测的，但幸运的是，这些日冕亮环勾勒出了磁场的位形及变化。这使我们可以从接收到的光辐射(图像)推断日冕中的磁场变化。

在目前普遍使用的标准耀斑模型里^[2]，因太阳表面运动而受到剪切作用的磁环系由于不稳定性而向上拱起，环系两侧相反的磁力线之间会形成电流片，当磁场开始在这里耗散时，磁压进一步减小，而使两侧的磁力线被“吸”进电流片重联(称为磁力线入流区)，新连接的磁力线则分别从上下两端像绷紧的弦由磁张力弹出重联区(称为磁力线出流区)。向上的部分连接成一个磁绳，最终抛离太阳表面形成CME，而向下的部分形成具有较小剪切角的新磁环系(达到更稳定的低能状态，称为耀斑环或耀斑后环)。重联区和出流区使

4) 多波段/多温度探测日益成为重要的观测研究手段。一种谱线对应于某个特定温度范围，因而在单一谱线内观察往往会一叶障目，无法得到完整信息。举例来说，若一个日冕环在某一谱线的图像内消失了，并不意味着这个环不存在了，有可能是冷却或被加热到了其他温度。

磁能释放, 加速粒子并加热等离子体, 形成后续的一系列大气响应过程, 并产生各个波段上的辐射增强。被加速的高能电子沿耀斑环向下注入到两侧足点的低层大气, 这里等离子体密度大, 温度相对较低。高能电子因和本地等离子体发生大量碰撞而损失能量, 从而加热大气并辐射出X射线韧致辐射(X射线足点源)。而受到电子的轰击被快速加热的大气急剧膨胀, 向上蒸发从而充满耀斑环。耀斑观测的其中一个任务, 便是寻找与这些过程相关的证据。

20世纪70年代以后, 随着一系列太阳观测卫星的升空, 空间探测快速发展, 获得了前所未有的太阳大气资料。耀斑中磁重联的证据也逐渐积累起来。尽管其中的大多数都只是可能与磁重联的某些过程相关, 有些甚至可能是由其他过程而非磁重联造成, 但它们依然对认识耀斑过程非常重要。这些证据主要包括, 重联入流和出流的迹象, cusp尖角结构, 电流片, 日冕双X射线源等^[14]。例如, Yokoyama等^[15]于2001年首次观测到较为清晰的入流现象; Masuda等^[16]于1994年在*Nature*杂志首次报告, 除常见的耀斑环足点X射线源, 还存在位于耀斑环上方的硬X射线源, 这可能是磁重联出流对环系的冲击造成的; Lin等^[17]和Liu等^[18]分别报告了对电流片的多方面观测; Wang等^[19]发现了耀斑中的高速出流。然而, 这些分散在不同事件、不同数据中的现象无法给出一个完整的磁重联图像。

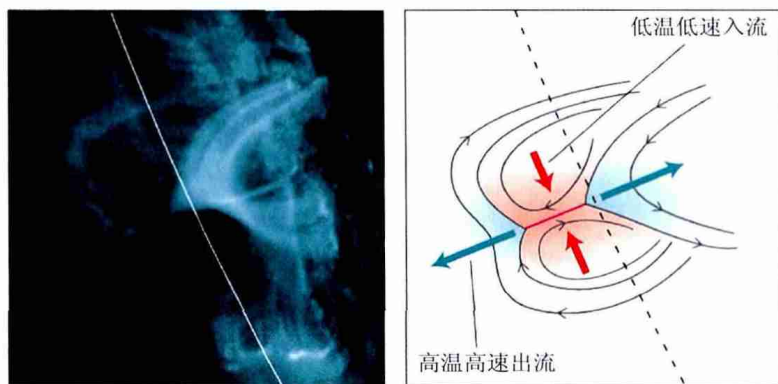


图6 Terry Forbes在其评论文章^[20]中对Su等人研究的太阳爆发所做的图解。左侧是AIA 131 Å的观测, 右侧是磁场重联的示意图。红色箭头代表相对低温的入流, 蓝色箭头代表高温出流, 红线代表中间的电流片

3 太阳动力学观测卫星(SDO)时代

在各种数据里面搜索太阳磁重联的证据, 就像物理学家在云室中寻找新粒子的蛛丝马迹。而这种搜索需借助对日冕环的详细观测。2010年, 美国宇航局的太阳动力学观测卫星SDO发射升空。这是太阳物理历史上具有标志性意义的一颗卫星。SDO载有三台仪器, 其中的大气成像组件AIA(Atmospheric Imaging Assembly^[20])可在紫外、极紫外波段的十个通道内对太阳进行全日面不间断成像, 覆盖从几千度到约两千万度的温度范围。像素大小为0.6角秒(约日面上的400多千米), 成像间隔时间约为12秒。虽然SDO可以看作是1995年发射的太阳与太阳风层探测器(SOHO)的一个升级版, 但是它给太阳观测和研究带来的是质的提升。高时间和空间分辨率观测使SDO的数据量异常庞大, 仅一天的数据就达到1.5 Tb。因此, SDO被置于地球同步轨道上, 以便实时将观测数据以130 Mbps的速度发回新墨西哥州的地面站。

SDO的多波段/多温度观测能力使对耀斑磁重联证据的系统性搜寻成为可能。2013年, Yang Su等^[14]在*Nature Physics*杂志上报告了一个C级爆发中磁场重联的详细证据。同期杂志还发表了磁重联专家Terry Forbes的评论文章^[21], 认为该工作几乎找到了太阳爆发中磁重联的各种要素。

这个爆发是在2011年8月17日被SDO记录到的。Su等人通过SDO/AIA在极紫外观测到的太阳图像发现, 较冷的日冕环(从几万度到百万度)不断地由南北两侧相互靠近, 相遇后消失。与此同时, 高温环(超过一千万度)在中间形成, 并在磁张力的作用下分别向上扩张, 向下堆积, 由初始的尖角状变化成能量更低更稳定的环状。同时在太阳表面, 这些环的足点区因被加热而增亮(图6和图7)。所有这些迹象都支

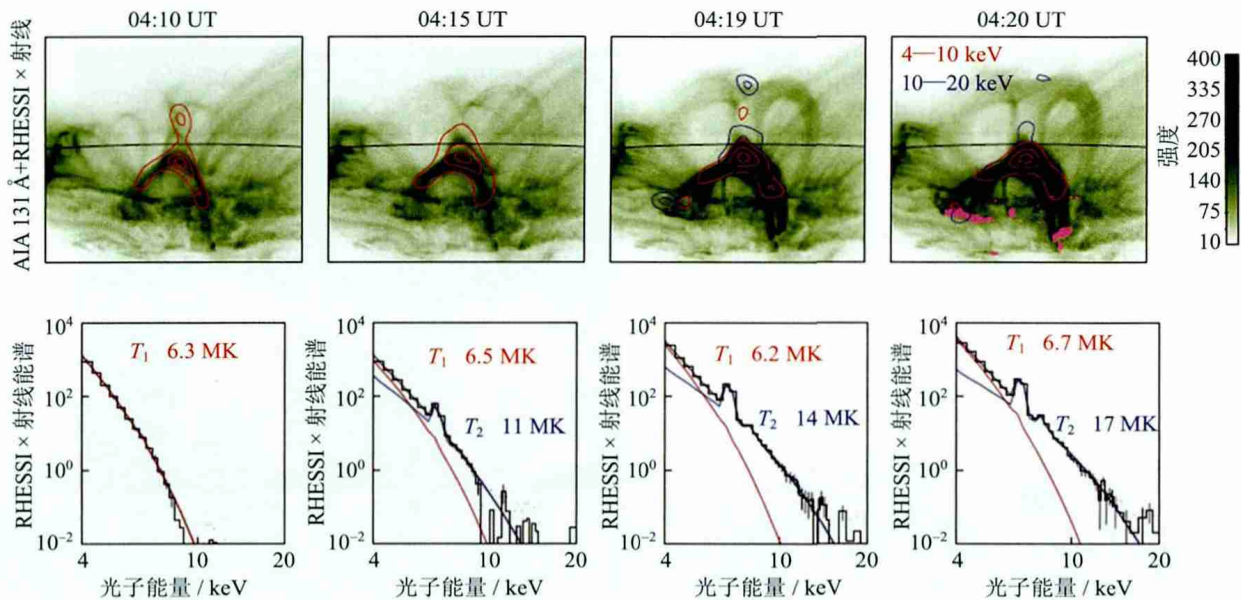


图7 上面的图显示不同时刻(国际时间)SDO/AIA观测到的热环和RHESSI观测到的X射线源(等值线)。图中粉红色标示出了日面上被加热的区域,它们对应于耀斑环的足点区。下面的图显示了RHESSI观测到的X射线能谱。通过对其进行双温度拟合得到两个热辐射分量,分别对应两个温度的等离子体(由红色和蓝色标出)。本图取自Su等人的文章^[14]

持耀斑磁重联的经典图像,尽管这个图像中的结论大都来自二维的情况。实际上,两组环系之间发生了重联,产生新的两组闭合的环系,是三维磁重联的一种。虽然SDO已记录到了相当多的爆发,但能够看到完整重联过程的却非常少。2011年8月17日的爆发事件是目前最完整的一个事例。这主要是因为:(1)这个爆发级别大小合适。由于AIA的仪器灵敏度非常高,大耀斑往往造成一些像素过饱和,使得耀斑区的细节丢失。而这个C级耀斑中不存在这种问题。另一方面,该事件虽然级别不大,但空间尺度并不小,因而容易分辨其空间结构。(2)这个耀斑发生的位置和角度,使得在地球的方位可以观察到整个磁结构的演化,如入流环和出流环的运动。而其他很多事件中由于观测角度垂直于环面或位于重联区上方而无法看到完整的重联过程。

然而,AIA单独提供的信息仍不足以令人信

服。因为虽然AIA的各个极紫外通道具有不同的特征温度(即对该温度最敏感),但实际上它们对从几十万度到几千万度的温度范围都有不同程度的响应,在不同的结构内占主导地位的谱线也不同^[22],这意味着很难确定某一通道内观测到的结构所具有的温度。这时需要由其他仪器或波段来加以证实。因此Su等人利用RHESSI卫星,对耀斑区进行X射线成像和谱型研究。

RHESSI(the Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager),全称是太阳高能分光成像谱仪^[23],由加州大学伯克利分校和NASA戈达德飞行中心共同研制,于2002年升空,使用高纯锗(Ge)探测器监测3—300 keV的太阳耀斑X射线和高于300 keV的 γ 射线爆发⁵⁾。其对X射线能谱的能量分辨率可达1 keV,并可在X射线和 γ 射线能量段进行成像^[24]。至2013年12月,RHESSI已记录到超过8万个耀斑。

5) 太阳X射线和 γ 射线爆发属于太阳高能物理。其中X射线主要有两种来源,一种是被加热到千万度高温的等离子体辐射出的热韧致辐射,另一种是被加速到高能电子同耀斑区的等离子体相互作用产生的非热韧致辐射。两者的根本区别在于电子分布,前者是热电子,具有麦克斯韦分布,后者是非热电子,通常是单幂律谱形式。感兴趣的读者可查阅“现代太阳物理丛书”系列中由甘为群和王德靖所著《太阳高能物理》^[24]一书。

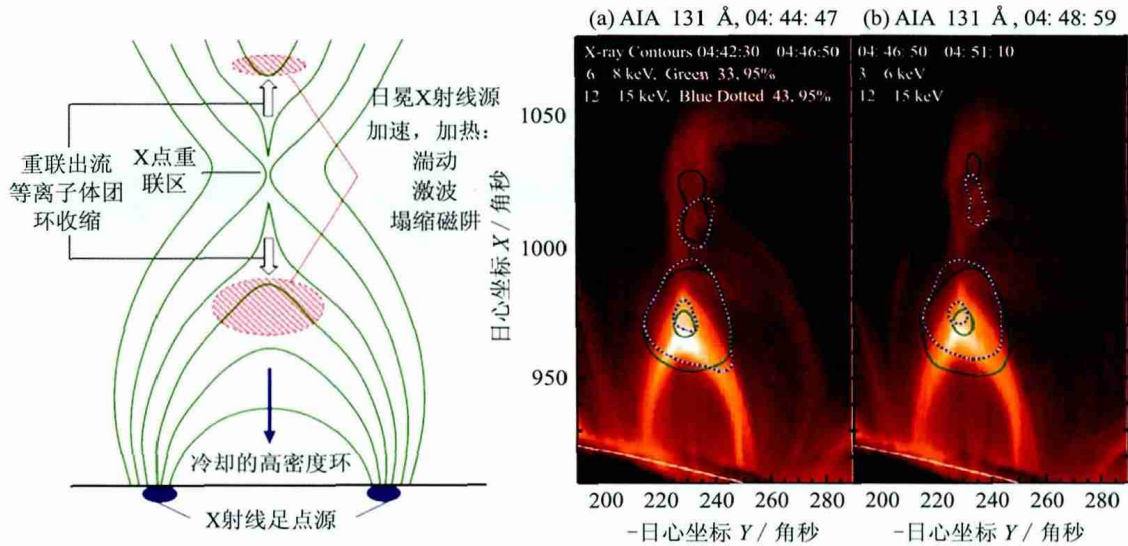


图8 左侧显示了一个太阳爆发的磁重联示意图; 右侧的两幅图像显示的是SDO/AIA所观测到的磁重联, 包含热耀斑环、尖角状结构以及X射线源(等值线, 由RHESSI成像得到)。X和Y表示日心坐标系东西和南北方向上距离日面中心的距离。其中1角秒对应太阳上700多千米。该图取自Liu等人的文章^[26]

在2011年8月17日的爆发事件中, RHESSI充分显示出了其在X射线能段的优秀成像能力(图7)。4—10 keV的X射线像完美地描绘出同AIA 131 Å图像一致的耀斑环, 并显示出重联区附近存在热源。高一些的10—20 keV X射线像则在重联区上下两个尖角状结构处, 即重联出流区观测到了X射线源, 说明这些地方确实存在能量释放。X射线能谱显示等离子体被逐渐加热至1700万度(图7)。所有这些都支持AIA所记录的重联过程。实际上, 类似的事例曾在2009年由Leping Li和Jun Zhang观测到^[25], 但受限于仪器的数据质量以及观测角度等, 该结果并未受到重视。

对2012年的另一个爆发事件, Wei Liu等^[26]同样利用SDO和RHESSI发现了磁重联的证据, 以及出流区被加热的等离子体和被加速的电子(图8)。这个事件还产生了CME, 是一个抛射型爆发, 然而, 稍显遗憾的是没有观测到入流的迹象。

在以上这两个爆发事件中, RHESSI在日冕重联区上下的出流区都发现了两个日冕X射线源。这种现象是在2003年由Sui和Holman在另一个耀斑中首次观测到的^[27], 被解释为重联电流片两端进行能量释放的证据, 是RHESSI最重要的成果之一。但由于当时没有其他数据, 这个结论无法得到验证。现在SDO和RHESSI在极紫外和

X射线的联合观测证实了这个结论的正确性, 这对日冕中的磁场重联提供了强有力的支持。

4 太阳爆发研究的趋势

这些研究结果的发表可以说给太阳磁重联证据的寻找之路画上了一个句号, 但我们对太阳爆发的理解和掌握还远远不够。磁重联中磁能是怎样具体被转化成热能和粒子动能的? 太阳爆发是如何被触发的? 能否预测爆发事件的发生时间、规模和地点? 太阳等离子体活动如何能帮助解决实验室等离子体和聚变装置中的问题? 太阳爆发中的辐射和磁云究竟如何影响地球空间环境、气候天气、电子设备及宇航员? 如何减小这些影响? 这些问题都是尚未解答的。在将来的太阳物理中, 磁重联的研究仍将长期占有重要一席, 不仅因为太阳爆发中的重联细节尚不清楚, 更因为磁重联也被认为在太阳上其他一些现象中扮演重要角色, 比如暗条形成、喷流以及日冕加热等。

当前的太阳爆发研究, 主要有以下三个方面的趋势值得注意:

(1) 观测上, 向更高空间、时间和能谱分辨率发展。着重利用多波段观测数据提取磁场重联及能量释放的细节特征, 分析各层大气对重联所释

放能量的响应过程和粒子加速过程。

天文学是着重观测的学科，观测的重要性相当于物理中的实验。高时间/空间/能谱分辨率数据可以提供更丰富的信息，会极大地推动人们对天体的认知。如瑞典1 m太阳望远镜的空间分辨率可达日面上150 km(约0.2角秒)。自2002年以来，《Nature》和《Science》杂志已发表6篇使用该数据的文章。但是地面天文仪器往往受限于地球大气的干扰、天气的变化和日夜交替等，而在空间不存在这些问题。因此，除了改进地面观测技术之外，世界各航天大国一直都在大力发展空间太阳观测卫星(图9)，一方面提高时空分辨率，另一方面提出各种创新式的观测方式。比如SOHO，被放置在日地拉格朗日点；STEREO，由两个卫星组成，从地球出发分别向前向后飞行，形成与地球不同的两个视角，从而使太阳爆发的立体观测和预警成为可能；Solar Probe和Solar Orbiter，这

两个探测器将在2017年前后首次抵近太阳观测。

由于空间观测对极端环境下仪器的生存能力要求很高，科研观测的需求也在积极推动各种相关行业的进步，如材料、光学、能源、机器人技术、航天技术、教育、工业制造技术、自动化技术、测控技术、系统集成、项目管理、甚至IT技术等。SDO所带来的挑战之一就包括大数据时代下的远距离无线传输能力、数据储存、管理及搜索能力等。中国的太阳物理研究基本同世界保持同步，但在太阳空间探测方面差距较大。虽然中国太阳物理界曾提出并积极推进“深空太阳天文台”、“先进天基太阳天文台”、“夸父”等空间探测计划，但迄今尚未发射过一颗太阳探测卫星。作为首个详细观察和记录黑子的国家，以及一个航天大国，中国应尽快发射自己的太阳观测卫星，为世界太阳物理和空间天气研究做出贡献。

(2)理论上，随着计算机技术尤其是超级计算

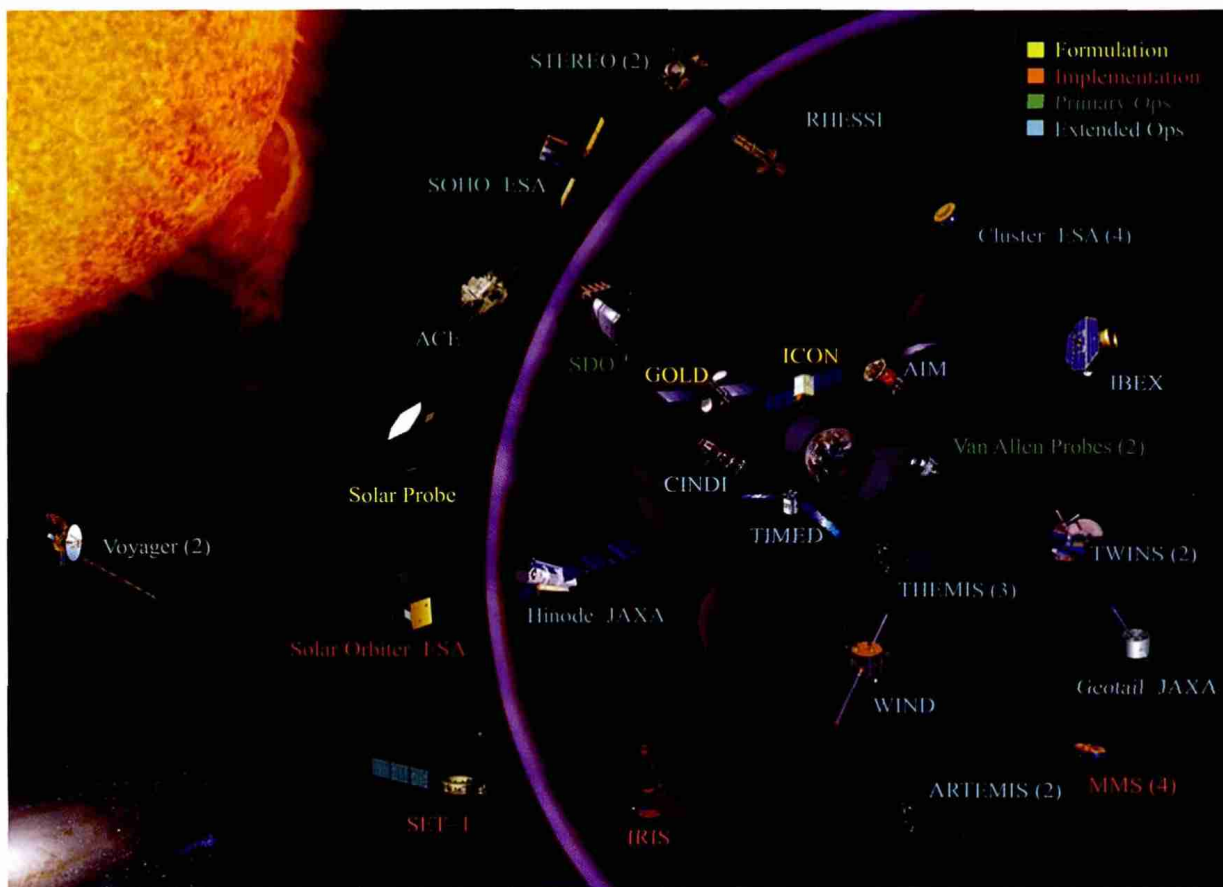
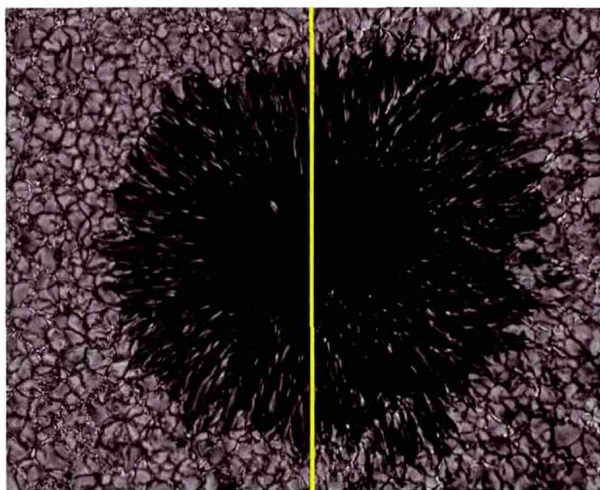


图9 目前在轨和规划中的一些空间太阳观测卫星，它们主要来自美国国家航空航天局(NASA)，欧洲航天局(ESA)和日本宇航局(JAXA)。图片来自美国宇航局/戈达德航天飞行中心网站(NASA/Goddard Space Flight Center)

图10 黑子和光球的大尺度数值模拟和实际观测的比较图⁶⁾。左侧是美国高山天文台 (HAO/NCAR) Matthias Rempel 使用超算模拟的黑子, 右侧是美国国家太阳天文台(NSO)F.Woeger 实际观测到的黑子。此图取自 Matthias Rempel 在 2011 年美国太



阳物理年会上获得美国天文学会太阳物理部(AAS/SPD)Harvey奖时所做的报告。大尺度、高精度数值模拟日益成为重要的科研工具



图11 此图来自美国科幻电视剧《星际之门》，展示的是一个先进文明的恒星监测预报系统。剧情中这个数字化的太阳运行在该文明所掌握的各种物理过程之上，可以预测并显示出爆发活动的时间、地点甚至强度。这相当于高度进化版的数值模拟。此图取自 gateworld.net

机的发展, 大尺度三维磁重联的数值模拟将成为重点。尽管可能存在可调参数多、边界条件不确定、物理过程不全面等问题, 数值模拟仍是结合理论和观测的重要研究工具。其意义在于, 它是建立在已知的物理过程基础上的, 可以直观地显示理论研究的成果, 并同观测相比较。而观测能

力的提高也可以提供更有物理意义的参数和边界条件。图10中黑子的数值模拟结果同观测的比较便是一个很好的例子。

越来越多的观测显示出二维磁重联模型的局限性, 因此发展更符合实际的三维磁重联是必然的。Su等人的结果显示了三维磁重联中入流环的一些新特点, 如入流不对称、加速进入重联区和入流环扩展等, 这些应该在新的三维模型中考虑进去。虽然三维情况下的磁结构^[28]可能非常复杂, 但幸运的是, 超级计算机和数值模拟的发展或许可以帮助我们最终解决三维情况下遇到的各种难题。

还有一种模拟值得一提, 即在等离子体实验室内模拟太阳上的现象。如Jiayong Zhong等人^[29]成功利用神光II高功率激光实验装置在小尺度上模拟了太阳爆发中被重联加热的耀斑环及环顶的X射线源, 该成果发表在2010年的*Nature Physics*杂志上, 并入选2011年中国科学十大进展。这给研究和理解不同尺度等离子体系统中的重联现象提供了新的思路。

(3)应用上, 即在空间天气监测和预报上, 主要是通过各种模型和实际观测预估高能粒子和CME在日地空间的传播过程, 预报对地球空间环境的影响, 其中也包括尚在起步阶段的耀斑发生预测。由于太阳爆发越来越受到重视, 很多国家, 包括中国, 都建立了空间天气研究和预报中心。将来的模型可能更加系统化, 包含

6) 有意思的是, 大尺度、高精度的黑子模拟所产生的数据远远超过了观测所得的数据。为了寻找有意义的新结果, 研究人员不得不花大量的时间在这自产的数据堆里挖掘。然而, 倘若其中有参数不合理或者物理过程缺失, 新结果是否仍有重要意义就是个问题了。

从太阳爆发产生一直到抵达地球甚至其他更远行星，并和行星磁层相互作用的整个过程。

其中，太阳爆发的触发阶段及之前的能量积累阶段可能会成为一个重点。这个过程包含许多重要信息，比如磁场重联的诱发、暗条的不稳定性、爆发前期和初期的能量释放、磁场运动的储能过程等。这些方面的研究需要综合观测和理论

上的知识，其成果会使预测太阳爆发成为可能，从而给太阳物理带来突破。

总之，太阳爆发研究，以及范围更广阔的太阳物理和恒星物理研究仍有很长的路要走。或许一个运行在人类全面掌握的恒星物理知识基础上的数字化太阳(如图 11)，才是太阳物理的终极目标。

参考文献

- [1] Fletcher L *et al.* Space Sci. Rev., 2011, 159: 19
- [2] Shibata K, Magara T. Living Rev. Solar Phys., 2011, 8: 6
- [3] Chen P F. Living Reviews in Solar Physics, 2011, 8: 1
- [4] Feng L, Wiegmann T, Su Y *et al.* The Astrophysical Journal, 2013, 765: 37
- [5] Carrington R C. Mon. Not. R. Astron. Soc., 1859, 20: 13
- [6] 方成, 丁明德, 陈鹏飞. 太阳活动区物理. 南京大学出版社, 2008
- [7] Kosovichev A G, Zharkova V V. Nature, 1998, 393: 317
- [8] Osten R A *et al.* The Astrophysical Journal, 2007, 654: 1052
- [9] Priest E, Forbes T. Magnetic Reconnection. Cambridge University Press, 2000
- [10] Miller J L. Physics Today, 2013, 9: 12
- [11] Yamada M, Kulsrud R, Ji H T. Rev. Mod. Phys., 2010, 82: 603
- [12] Aschwanden M J. Physics of the Solar Corona. An Introduction. Praxis Publishing Ltd., 2004
- [13] Coontz R. Science, 2012, 336: 1090
- [14] Su Y, Veronig A, Holman G D *et al.* Nature Phys., 2013, 9: 489
- [15] Yokoyama T *et al.* Astrophys. J., 2001, 546: L69
- [16] Masuda S *et al.* Nature, 1994, 371: 495
- [17] Lin J *et al.* Astrophys. J., 2005, 622: 1251
- [18] Liu R *et al.* Astrophys. J., 2010, 723, L28
- [19] Wang T J, Sui L H, Qiu J. Astrophys. J., 2007, 661: L207
- [20] Lemen J R *et al.* Solar Phys., 2012, 275: 17
- [21] Forbes T G. Nature Physics, 2013, 9: 456
- [22] O'Dwyer B, Del Zanna G, Mason H E *et al.* Astronomy and Astrophysics, 2010, 521: A21
- [23] Lin R P, Dennis B R, Hurford G J *et al.* Sol. Phys., 2002, 210: 3
- [24] 甘为群, 王德焯. 太阳高能物理. 科学出版社, 2002
- [25] Li L P, Zhang J. Astrophys. J., 2009, 703: 877
- [26] Liu W, Chen Q R, Petrosian V. Astrophys. J., 2013, 767: 168
- [27] Sui L H, Holman G D. Astrophys. J., 2003, 596: L251
- [28] Priest E R, Forbes T G. Astron. Astrophys. Rev., 2002, 10: 313
- [29] Zhong J Y, Li Y T, Wang X G *et al.* Nature Physics, 2010, 6: 984



极紫外波段的太阳磁重联结构

封面图显示的是 2011 年 8 月 17 日太阳爆发事件中磁场进行重联的伪彩色图像。其中红色代表温度相对较低的百万度级的日冕环，绿色代表重联后新形成的千万度级的耀斑环，蓝色显示的是太阳表面的结构。图中以地球的大小来对比一个中等规模太阳爆发的规模尺度。图像数据来自美国国家航空航天局 (NASA) 的太阳动力学观测卫星 (SDO)，后由苏杨处理合成该封面图。

这里显示的图像色彩大多都是伪彩色。这是因为，获取这些图像的波段在可见光之外，人眼无法看到，因此也谈不上人眼对颜色的定义。为了区分多个波段/通道的观测，每个观测卫星通常有自己的颜色表。科研人员也可以使用自定义的色彩来渲染，以突出显示某些结构。该封面图便是利用三个波段所摄图像，分别放入 R, G, B 三个通道合成的。许多绚丽迷人的哈勃 (Hubble) 太空图也是如此合成的。